

УДК 621.313

## ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАРТЕРНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ И ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

КАЗАКОВ Ю.Б., д-р техн. наук, ЛАЗАРЕВ А.А., асп., ГНУТОВ С.К., инж.

Рассмотрены особенности и режимы работы стартерных электродвигателей с электромагнитным возбуждением и возбуждением от постоянных магнитов. Выполнено сравнение показателей и характеристик электродвигателей различных вариантов. Показаны преимущества использования в магнито-электрических стартерах высокоэнергетических магнитов на основе NdFeB.

*Ключевые слова:* стартерные электродвигатели, мощность электродвигателя, электромагнитное возбуждение, постоянные магниты.

## CHARACTERISTICS OF STARTER ELECTROMOTORS WITH ELECTROMAGNETIC ACTUATION AND ACTUATION FROM CONSTANT MAGNETS

Yu.B. KAZAKOV, Ph.D., A.A. LAZAREV, postgraduate, S.K. GNUTOV, engineer

This paper is devoted to the peculiarities and operating regimes of starter electromotors with electromagnetic actuation and actuation from constant magnets. There is the indicators and characteristic comparison of electromotors of different types. The authors have shown the advantages of high-energy magnets, based on NdFeB, using in magnetolectric starters.

*Key words:* starter electromotors, electromotor capacity, electromagnetic actuation, constant magnets.

В качестве стартерных электродвигателей системы пуска двигателей внутреннего сгорания автомобилей обычно используются двигатели постоянного тока последовательного электромагнитного возбуждения с мягкой механической характеристикой. Режим работы стартеров кратковременный. Электродвигатели выполняются высокоиспользуемыми, компактными. Линейная нагрузка якоря, плотность тока в обмотках, плотность тока под щетками могут в 4–5 раз превышать значения, используемые в двигателях для продолжительного режима работы. Индукция в элементах магнитной системы предельная.

Стартерные электродвигатели выпускаются массовыми сериями, общий объем выпуска достигает более миллиона штук в год. Поэтому разработка и совершенствование конструкции и методики расчета стартерных электродвигателей является актуальной задачей.

Температурные условия работы стартеров составляют от  $-40$  до  $+80$  °С. Стартерные электродвигатели работают от источника питания ограниченной мощности – аккумуляторной батареи. Напряжение на их зажимах уменьшается с увеличением нагрузки из-за падения напряжения на внутреннем сопротивлении батареи. Сопротивление батареи возрастает с понижением температуры электролита и степени заряженности батареи. Наиболее ответственным является пуск при низкой температуре и достаточно разряженной батарее, когда пусковой ток невелик. Повышение пусковых свойств стартеров с электромагнитным возбуждением практически невозможно [1].

В последнее время начали выпускаться стартеры магнитоэлектрического возбуждения. Применяются достаточно дешевые, но с не очень высокими магнитными свойствами ферритовые магниты 22БА220. Появление высокоэнергетических магнитов NdFeB, обладающих предельными значениями остаточной индукции и коэрцитивной силы, делает актуальной задачу их применения в стартерных электродвигателях. Особенностью магнитов NdFeB является наличие сильной температурной зависимости магнитных свойств, например для коэрцитивной силы – до  $-0,6$  %/°С. То есть с понижением температуры у таких магнитов возрас-

тают магнитные свойства [2]. При низкой температуре эти магниты обладают повышенным магнитным потоком и могут обеспечить необходимый пусковой момент при низком пусковом токе. С ростом температуры свойства магнитов падают, но снижается и сопротивление батареи, что повышает пусковой ток и обеспечивает сохранение пускового момента. Мягкость механической характеристики при пуске обеспечивается, в том числе, противоположными температурными зависимостями сопротивления батареи и магнитных свойств магнита. Отсутствие в такой конструкции обмотки возбуждения с ее внутренним сопротивлением повышает пусковой ток и снижает требуемую емкость аккумуляторной батареи.

Рассмотрены несколько вариантов стартерных электродвигателей: с электромагнитным последовательным возбуждением и с возбуждением от постоянных магнитов 22БА220 и Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B. Анализ результатов расчета электромеханических показателей стартерных электродвигателей различных вариантов (см. таблицу) показал, что магниты Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B обладают более высокими, чем магниты 22БА220, магнитными свойствами, вследствие чего применение такой же высоты магнитов Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B, как и для магнитов 22БА220, приводит к значительному повышению магнитного потока и электромагнитного момента, но одновременно снижает частоту вращения якоря, что затрудняет запуск двигателей внутреннего сгорания. Для запуска двигателей внутреннего сгорания необходима частота вращения не менее определенной величины. На основе нескольких предварительно рассчитанных конструкций было выявлено, что возможно снизить высоту магнитов Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B  $h_m$  с 9 до 0,6 мм и уменьшить наружный диаметр стартера с 79 мм до 62,2 мм, сохранив при температуре  $T = +20$  °С электромеханические показатели стартера такими же, как для магнитов 22БА220 с высотой магнитов 9 мм. Возможно применение магнитов NdFeB в виде сегментов тонкого кольца.

В наиболее тяжелых условиях пуска при температуре  $T = -30$  °С, несмотря на принятую степень разрядки аккумуляторной батареи 25 %, сниженный из-за повышения сопротивления батареи на 20 % ток, учет

сопротивления подводющих проводов, вследствие повышения магнитных свойств магнита NdFeB электромагнитный момент в точке максимальной мощности для варианта стартерного электродвигателя с  $h_M = 0,6$  мм при  $T = -30$  °С возрастает на 37 %, по сравнению с электромагнитным моментом стартера при  $T = +20$  °С.

Номера электрохимических характеристик стартерных электродвигателей (см. рисунок) соответствуют номерам вариантов стартерных электродвигателей (см. таблицу).

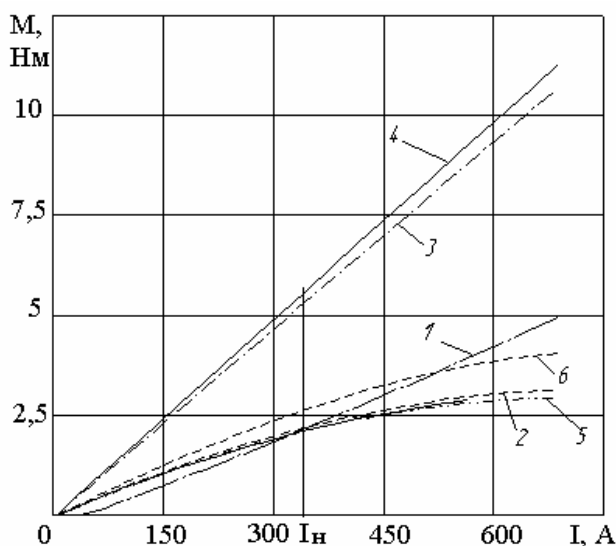
Расчетная точка максимальной мощности стартерного электродвигателя и оптимальной его работы соответствует току  $I_n = 340$  А. Очевидно, что электрохимические характеристики для вариантов 1, 2 и 5 (см. рисунок) совпадают. В случае работы системы пуска с использованием в стартерном электродвигателе ПМ NdFeB с толщиной магнита  $h_M = 0,6$  мм при температуре  $T = -30$  °С сохраняется запас по величине магнитного потока и, соответственно, электромагнитного момента.

Стартерный электродвигатель с электромагнитным возбуждением имеет наибольшие габариты, но и наименьшую стоимость благодаря отсутствию в нем

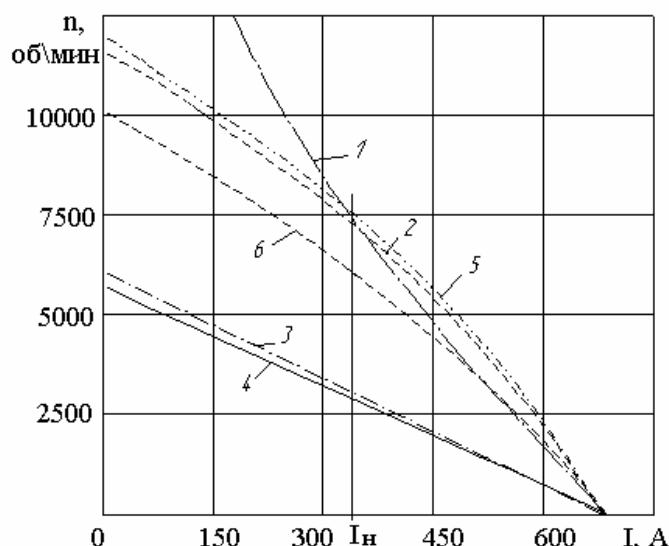
дорогостоящих постоянных магнитов. Если сравнивать стартерные электродвигатели с постоянными магнитами, то хотя магниты Nd2Fe14B и дороже магнитов 22БА220, но меньшая их масса, из-за уменьшенной толщины магнитов, приводит к общему снижению стоимости. В целом цена стартерных электродвигателей разных вариантов отличается несущественно.

Особенности конструкции и работы стартерных электродвигателей требуют при расчетах их магнитного и теплового состояний использования полевых моделей. Магнитные свойства магнита определяют потери в стали двигателя, что вызывает нагрев двигателя, который, в свою очередь, определяет магнитные свойства магнита. Поэтому магнитные и тепловые поля в магнитоэлектрических стартерных электродвигателях с магнитами NdFeB должны рассчитываться взаимосвязанно.

Одновременно динамика пуска карбюраторных двигателей внутреннего сгорания стартерными электродвигателями с постоянными магнитами должна рассматриваться с использованием полевых магнитных и цепных электрических моделей.



а)



б)

Электрохимические характеристики вариантов стартерных электродвигателей: а – моментная; б – скоростная; 1 – электромагнитное последовательное возбуждение при температуре пуска  $T = +20$  °С; 2 – магнитоэлектрическое возбуждение от магнитов 22БА220 высотой  $h_M = 9$  мм при  $T = +20$  °С; 3 – магнитоэлектрическое возбуждение от магнитов Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B высотой  $h_M = 9$  мм при  $T = +20$  °С; 4 – магнитоэлектрическое возбуждение от магнитов Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B высотой  $h_M = 9$  мм при  $T = -30$  °С; 5 – магнитоэлектрическое возбуждение от магнитов Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B высотой  $h_M = 0,6$  мм при  $T = +20$  °С; 6 – магнитоэлектрическое возбуждение от магнитов Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B высотой  $h_M = 0,6$  мм при  $T = -30$  °С

### Расчетные показатели стартеров

№ варианта	1	2	3		4		5		6	
			Магнитоэлектрическое (от магнитов 22БА220)		Магнитоэлектрическое (от магнитов Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B)		Магнитоэлектрическое (от магнитов Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B)		Магнитоэлектрическое (от магнитов Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B)	
Возбуждение	Электромагнитное последовательное	Магнитоэлектрическое (от магнитов 22БА220)	Магнитоэлектрическое (от магнитов Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B)		Магнитоэлектрическое (от магнитов Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B)		Магнитоэлектрическое (от магнитов Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B)		Магнитоэлектрическое (от магнитов Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B)	
		$h_M = 9$ мм	$h_M = 9$ мм		$h_M = 9$ мм		$h_M = 0,6$ мм		$h_M = 0,6$ мм	
Диаметр, м	0,082	0,079	0,079		0,079		0,0662		0,0662	
Длина, м	0,274	0,254	0,254		0,254		0,254		0,254	
Цена, руб	2140	2266	3365		3365		2228		2228	
Температура пуска, °С	+20°С	+20°С	+20°С		+20°С		-30°С		+20°С	
Мн, Нм	2,16	1,99	4,73		5,04		1,38		1,92	
$n_n$ , об/мин	7306	7757	3349		3147		10944		8020	
Рэм. макс, Вт	1653	1667	1642		1644		1585		1606	

**Список литературы**

1. **Казаков Ю.Б., Щелькалов Ю.Я.** Совершенствование конструкции активной зоны стартерных электродвигателей: Мат-лы Всерос. Электротехн. конгресса. – М.: РАН, АЭН РФ, 2005. – С. 162–164.
2. **Казаков Ю.Б.** Анализ магнитных и тепловых полей магнитоэлектрических машин с учетом термозависимости свойств магнитов // Электричество. – 2001. – № 12. – С. 23–27.

*Казаков Юрий Борисович,*  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электромеханики,  
телефон (4932) 26-97-06,  
e-mail: elmash@em.ispu.ru

*Лазарев Александр Александрович,*  
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант кафедры электромеханики,  
e-mail: elmash@em.ispu.ru

*Гнутов Сергей Константинович,*  
Сызранский филиал Самарского государственного технического университета,  
старший преподаватель,  
e-mail: elmash@em.ispu.ru